

dr hab. inż. Zbigniew J. Sroka prof. uczelni

Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Pojazdów
wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
tel: +48-71-3477918, zbigniew.sroka@pwr.edu.pl

Wrocław, 22.08.2019

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Józefa Raka

**pt. „Numeryczna analiza procesów cieplno-przepływowych
w komorze roboczej maszyny spiralnej z uwzględnieniem
wpływu przecieków wzdluznych na współczynnik wnikania ciepła”**

Promotor rozprawy doktorskiej
dr hab. inż. Sławomir Pietrowicz prof. uczelni

Podstawa opracowania: pismo prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Gnutka prof. zw. - Dziekana Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej z dnia 15 lipca 2019, oznaczone W9/PW/1074/2019.

1. CHARAKTERYSTYKA PROBLEMATYKI ROZPRAWY I OCENA WYBORU TEMATU

Każde działanie podjęte w celu poprawy sprawności realizacji jakiegokolwiek procesu jest warte pochwały, gdyż zmierza w ostatecznym rozrachunku do pozyskania waloru przekształcenia energii. Tak też jest i w przypadku ocenianej rozprawy, kiedy to mgr inż. Józef Rak sygnalizuje już w tytule nie tylko naukowe, ale i pragmatyczne podejście do tematyki budowy i eksploatacji maszyny spiralnej.

Idea maszyny spiralnej nie jest nowa, bowiem pojawiła się ona już w roku 1905. Brak jednak stosownych technologii, zapewniających precyzyjne wykonanie części tej maszyny sprawił, że dopiero na przełomie lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych ubiegłego wieku idea ta zyskała na znaczeniu. Od tamtego czasu trwa nieprzerwana praca nad swoistym uszlachetnieniem procesów cieplno-przepływowych zachodzących w komorze roboczej tej maszyny, którą tworzą dwie spirale - jedna ruchoma poruszająca się ruchem mimośrodowym względem środka drugiej nieruchomej.

Proces sprężania (lub rozprężania) charakteryzuje się niskim poziomem hałasu, ponieważ pracy tego urządzenia nie towarzyszy zmiana momentu obrotowego, tak charakterystyczna dla maszyn tłokowych, a z kolei, teoretyczny brak kontaktu między powierzchniami spiral sprawia, że nie ma potrzeby smarowania olejowego w komorze. Można zatem, i tak też się definiuje, maszyny spiralne nazwać cichymi urządzeniami bezolejowymi, co przekłada się na ich aplikacje np. w przemyśle farmaceutycznym, spożywczym i elektronicznym. Najczęściej jednak są one wykorzystywane w urządzeniach chłodniczych i klimatyzacyjnych, których znaczenie wzrasta wobec wciąż postępującego ocieplenia klimatu.

Obok wspomnianych pozytywnych cech pracy maszyny spiralnej, istnieje jeszcze szereg innych zalet wartych podkreślenia. Są to między innymi: brak objętości szkodliwej, brak podgrzania czynnika przed wejściem do komory sprężania co pozytywnie wpływa na utrzymanie gęstości medium na określonym poziomie, a ta decyduje o stopniu napełnienia, brak zaworowego systemu wymiany ładunku oraz małe wymiary i waga urządzenia.

To co z jednej strony jest zaletą z drugiej staje się wadą, a przez to wyzwaniem dla badaczy w kontekście prawidłowej identyfikacji, a następnie próby poprawy konstrukcji lub technologii. W rozpatrywanym przypadku rzecz dotyczy przecieków, zwłaszcza wzdłużnych będących naturalną konsekwencją pracy maszyny spiralnej, ale których istnienie w znacznych udziałach całkowitej wymiany masy wpływa negatywnie na sprawność urządzenia.

Tematyka budowy maszyn spiralnych i procesów w nich zachodzących wraz z zagadnieniem przecieków, będące od wielu lat przedmiotem badań zarówno Autora niniejszej rozprawy jak i Promotora profesora Sławomira Pietrowicza, a także innych badaczy jak np.: Yanagisawy, Zhanga, Fukuty, Kapusty, Grzebielcy, poprzez ich wciąż niejednoznacznie określoną strukturę i funkcję stanowią o istotności podjętej tematyki, zarówno w aspekcie naukowym jak i utylitarnym. Z kolei, włączenie do analizy zagadnienia poszukiwań optimum eksploatacyjnego maszyny spiralnej numerycznej mechaniki płynów – CFD (Computational Fluid Dynamics) z zastosowaniem metody objętości skończonych – FVM (Finite Volume Method) wzmacnia oryginalność realizacji niniejszych badań.

Przez powyższe uważam, że wybór tematu rozprawy jest trafny, aktualny i oryginalny.

2. OCENA STRUKTURY PODZIAŁU TREŚCI I UKŁADU ROZPRAWY

Struktura rozprawy jest charakterystyczna dla prac naukowych tego typu, gdzie rozważania teoretyczne przenikają się z doświadczeniem. Można oczywiście podjąć dyskusję nad kolejnością działań, a tym samym układem prezentacji wyników tj. czy najpierw przeprowadzić badania eksperymentalne, a dopiero potem ustalać strukturę i funkcję modelu matematycznego – czy na odwrót?! W tym przypadku, co wynika z tytułu rozprawy, Autor postawił środek ciężkości na badania numeryczne, w ramach których opracował model matematyczny w oparciu o swoją dotychczasową wiedzę i dobrze dokonany przegląd literaturowy, a następnie przeprowadził testy doświadczalne dla oceny badanego zjawiska i walidacji modelu. Takie, w pełni świadome podejście do badań przez Autora, tłumaczy przyjęty układ rozprawy.

Wspomniany przegląd literatury zawarty we „Wstępie” i w następnym rozdziale, w którym Autor opisał zasadę działania maszyny spiralnej, uwzględniając stan wiedzy nt. wymiany ciepła w komorze roboczej, a także dotychczasowe prace nad modelami matematycznymi o różnym poziomie dokładności analiz oddają treści zawarte w kolejnych rozdziałach i są dobrym wprowadzeniem do sformułowania tezy, celu i zakresu badań.

Pracę kończy podsumowanie wyników badań oraz wnioski o charakterze naukowym. Brakuje, mimo wcześniejszych zapowiedzi, wniosków o charakterze utylitarnym i perspektywicznym.

W strukturze pracy znajdują się również wykaz ważniejszych oznaczeń oraz rozdział z bibliografią, ale niestety brak jest streszczeń w językach: polskim i angielskim.

Przez powyższe uważam, że układ ocenianej rozprawy jest właściwy, ale występują w niej braki niektórych elementów struktury podziału treści dedykowane rozprawom doktorskim.

3. MERYTORYCZNA OCENA ROZPRAWY

Merytoryczna recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Józefa Raka została dokonana poprzez ocenę: identyfikacji problemu badawczego, trafności postawionej tezy i zakresu badań, a także poprawności przyjętej metodyki badawczej i na podstawie analizy wyników.

W oparciu o treści zawarte w rozdziale nr 1, Autor przedstawił cel, tezę i zakres pracy, które zawiera rozdział nr 2.

Cel rozprawy stanowi o problemie badawczym, w którym można wyodrębnić dwa oddzielne zagadnienia. Pierwsze z nich to konieczność (wobec braku stosownych badań) poszerzenia wiedzy na temat możliwości poprawy sprawności izotermicznej maszyny spiralnej przez wymianę ciepła od gazu roboczego do łopatek maszyny. Drugie zagadnienie to potrzeba rewizji dotychczasowych metod wyznaczania współczynnika wnikania ciepła w maszynach spiralnych.

Cel pracy został postawiony bardzo szeroko, a z jego sformułowania nie wynika wprost (i nie stanowi on bezpośredniego przeniesienia do tezy pracy), że badane będą przecieki jako zjawisko towarzyszące pracy maszyny spiralnej. Znacznie korzystniejsze byłoby uznanie za opis celu sformułowanie, które znajduje się na stronie 23 pracy podsumowujące rozdział 1.2, i w którym ujęto przecieki jako istotę badań tj. *Zachodzi potrzeba sprawdzenia jak przecieki wewnętrzne w maszynie spiralnej wpływają na pole temperatury i zjawiska przepływowe wewnątrz komór roboczych, jako że brak w literaturze badań łączących przecieki i warunki wymiany ciepła.*

Niezależnie jednak od użytego sformułowania celu, intencja naukowa prowadzonych badań została poprawnie ujęta w tezie, która brzmi:

zaburzenia przepływu czynnika, wywołane przez przecieki wzdłużne, wpływają na współczynnik wnikania ciepła i procesy mieszania w komorze roboczej maszyny spiralnej, co pozwala na przybliżenie procesu sprężania do teoretycznej przemiany izotermicznej.

Autor sformułował również tezę pomocniczą, iż:
możliwe jest modelowanie zjawisk zachodzących w maszynach spiralnych w określonej fazie procesu za pomocą układu z tożsamą geometrią opartego na ruchu obrotowym.

Dalsza część rozprawy to trzy rozdziały, z których oznaczony jako nr 3 traktuje o modelowaniu matematycznym maszyny spiralnej, nr 4 to weryfikacja eksperymentalna i na końcu podsumowanie zawarte w rozdziale nr 5.

Na wstępie rozważań na temat modelowania, Autor nawiązał do modeli uproszczonych, opartych na parametrach zredukowanych, omówionych w rozdziale nr 1. Następnie przedstawił model maszyny spiralnej z użyciem metod numerycznych, które zapewniają dużą dokładność, mimo iż odbywa się to między innymi z dużym zapotrzebowaniem mocy obliczeniowej, a co za tym idzie wydłużonym czasem obliczeń. Autor zamieścił schemat postępowania (rys. 3.1.) podczas symulacji, podkreślając znaczenie transformacji domeny obliczeniowej w czasie. Obliczenia cieplno-przepływowe odbywały się przez rozwiązanie równań zachowania energii, pędu i ciągłości przy uwzględnieniu zmiennych warunków brzegowych, odwzorowujących zmianę kształtu komory(ór) roboczej(ych). W ten sposób realizacja przemiany termodynamicznej w maszynie spiralnej może być odzwierciedlona matematycznie przez transformację obszaru obliczeniowego. Wyniki pierwszych symulacji wykazały

zgodność z uzyskiwanymi przez innych badaczy, wskazując jednak na znaczące wartości błędów obliczeniowych spowodowane przyjętą formą interpolacji wyników pośrednich oraz deformacją siatki numerycznej. Autor poprawnie wyciągnął wnioski, modyfikując model po kącie warunków symulacji i kryterium stosowania łączenia lub zmiany siatki (remeshing). Model maszyny stał się de facto modelem przestrzeni zajmowanej przez czynnik roboczy, w którym wyłączono zjawiska przepływowe w kierunku osiowym, a tym samym pozbawiono analizę przecieków czołowych. W ten sposób przecieki wzdłużne stały się jedynym sposobem wymiany masy pomiędzy komorami, co należy uznać za dopuszczalne założenie badawcze, a na dodatek znacznie upraszczające postać modelu do dwuwymiarowego. Ważnym zabiegiem obliczeniowym dokonany przez Autora, przed zasadniczą symulacją, była identyfikacja gęstości siatki numerycznej i ocena jej wpływu na wyniki obliczeń, a przez to dokonanie wyboru minimalnej liczby węzłów zapewniających satysfakcjonujące wyniki. Szkoda jednak, że poza jednozdaniowym stwierdzeniem o jedno lub dwu procentowych różnicach między obliczonymi wartościami strumienia przepływu i temperatury gazu oraz wykresie wskazującym na odchyłki wyników (str. 44-45), nie ma szerszego opisu sposobu pozyskania tych danych co do liczby dokonanych prób, rodzaju odchyłek, sposobie ich wyliczania itp. co utrudnia pełną ocenę prezentowanego materiału.

Ustalenie ostatecznego modelu matematycznego zapewniło Autorowi możliwość dokonania szeregu symulacji np. określenie wpływu przecieków na sprawność przemiany termodynamicznej z pominięciem akumulacji ciepła w konstrukcji sprężarki lub przy wymianie ciepła przez łopatki czy też ocenę wpływu pola przepływu, kontrolowanego szerokością szczeliny promieniowej na przemianę termodynamiczną.

Wprowadzając do obliczeń dwa różne czynniki robocze tj. powietrze oraz dwutlenek węgla, rozszerzając zakres prędkości obrotowej sprężarki, stosując zabiegi adiabatyzacji łopatek, a także dokonując zmian szerokości szczeliny promieniowej Autor miał możliwość zbadania różnych charakterystyk dynamicznych przecieków wzdłużnych, zapewniając w ten sposób zbadanie wpływu kilku parametrów na chwilową wartość liczby Nusselta w komorze roboczej maszyny spiralnej. Wyznaczono również zależność średniej mocy sprężarki w funkcji liczby Reynoldsa Re_m , będące konsekwencją odbioru ciepła od czynnika, co skutkowało obniżeniem temperatury na wylocie z maszyny. Wykazano systematyczność rozbieżności pomiędzy wynikami uzyskanymi z różnych formuł obliczeniowych. Określając relację między liczbami Nusselta uzyskanymi w obliczeniach numerycznych w stosunku do obliczeń zredukowanych wykreowano parametr „C”, który z kolei odniesiony do liczby Reynoldsa z obszaru przecieków w komorze roboczej wskazał na silne skorelowanie bez względu na wartości ciśnień, prędkości obrotowych i stosowanych czynników roboczych. Dało to podstawę do weryfikacji liczby Nusselta poprzez wprowadzenie liczby skorygowanej, co w ostatecznym zestawieniu zapewniło znaczącą poprawę zgodności wyników numerycznych z wartościami opartymi o parametry zredukowane.

Uzyskane wyniki przyjęły wymiar logiczny, co oznacza uznanie modelowania za trafne, a sformułowane wnioski za wiarygodne, chociaż są one jedynie pośrednie wobec braku ostatecznego ujęcia zagadnienia tj. wykazania związku między przeciekami a współczynnikiem wnikania ciepła – jak zawarto w tytule, ale przed wszystkim jak postawiono w tezie rozprawy.

Wobec deklarowanych, podczas przeglądu literatury, trudności z bezpośrednimi pomiarami parametrów pracy maszyn spiralnych, Autor postanowił dodatkowo obok obliczeń numerycznych, zmierzyć się z tym zagadnieniem przez zbudowanie stanowiska badawczego, co jest przedmiotem rozważań w rozdziale nr 4.

Głównym celem było możliwie wierne odwzorowanie chwilowych warunków przepływowych panujących w komorze roboczej maszyny spiralnej, dla weryfikacji poprawności pomiarów cieplnych i wyznaczenie współczynnika wnikania ciepła w komorze.

Układ badawczy stał się obrotowym układem zastępczym o stałej geometrii oraz kontrolowanych parametrach prac tj.: temperatury, ciśnienia, strumienia ciepła i prędkości obrotowej. Uzyskane wyniki posłużyły do opracowania założeń do modelu numerycznego badanego układu i warunków brzegowych zaimplementowanych podczas symulacji. Zaproponowany układ jest ciekawym rozwiązaniem projektowym, które świadczy o dobrze rozwiniętej intuicji konstruktorskiej Autora.

Przy badaniu temperatury i gęstości strumienia ciepła, niezależnie od stosowanego czynnika roboczego, którym było powietrze lub dwutlenek węgla, a także przy zróżnicowaniu prędkości obrotowej i ciśnieniu oraz stosowaniu tzw. wąskiej lub szerokiej elipsy uzyskane wyniki symulacji oraz wyniki pomiarów na stanowisku badawczym są ilościowo i jakościowo zgodne, chociaż dyskusyjna jest liczba wykonanych pomiarów. Dwa pomiary dla każdej serii czyni metodykę niedoskonałą wobec konieczności prawidłowego szacowania niepewności pomiarowej tym bardziej, że Autor nie przedstawił sposobu wyznaczania błędu pomiarowego całego toru pomiarowego, ani też nie zamieścił oceny rozkładu normalnego danych pomiarowych. W związku z tym uzyskane wyniki nie zostały też skomentowane pod względem istotności matematycznej.

W wyniku badań eksperymentalnych Autor uzyskał ciekawe i godne stosowania szerzej wyniki, ale podobnie jak podczas obliczeń numerycznych nie spiął je deklarowaną klamrą o bezpośrednim wpływie różnych parametrów opisujących proces cieplno-przepływowy w maszynie spiralnej (lub w zastępczej komorze roboczej) na współczynnik wnikania ciepła.

Ostatni rozdział (nr 5) to podsumowanie, które de facto jest streszczeniem pracy i wnioski, w których obok zapisów oczywistych jak wnioski nr 1 i 2, istnieją sformułowania zbyt ogólne wobec wcześniej prezentowanych wyników. Na przykład, we wniosku nr 3, gdzie Autor potwierdza istnienie zależności pomiędzy wewnętrznym polem przepływu czynnika roboczego w komorze roboczej maszyny spiralnej oraz przeciekami wzdłużnymi pomiędzy komorami a warunkami wymiany ciepła, twierdząc, że zależność ta jest szczególnie widoczna dla wysokich ciśnień wylotowych z maszyny, równocześnie nie deklaruje charakteru tej zależności tj. czy jest ona rosnąca czy malejąca i czy jest ona mało istotna, istotna umiarkowanie czy mocna?! Zabrakło też wniosków o charakterze użytkowym i perspektywicznych, chociaż z zamieszczonych w poszczególnych rozdziałach treści można je zdefiniować.

Podobnie jest z końcowym stwierdzeniem Autora o udowodnieniu tezy tzn. jest ona udowodniona pośrednio poprzez powszechnie znane równanie Newtona tj. poprzez wykazanie zależności różnych parametrów z gęstością strumienia wnikania ciepła lub skorygowaną liczbą Nusselta, ale nie wprost z współczynnikiem wnikania ciepła

Podsumowując merytoryczną część oceny rozprawy doktorskiej należy stwierdzić, że:

- postawiona teza pracy „Zaburzenia przepływu czynnika, wywołane przez przecieki wzdłużne, wpływają na współczynnik wnikania ciepła i procesy mieszania w komorze roboczej maszyny spiralnej, co pozwala na przybliżenie procesu sprężania do teoretycznej przemiany izotermicznej” chociaż nie wprost, ale została udowodniona,

- prezentowane wyniki są prawidłowe i godne szerszych prezentacji, ale pod warunkiem ich usystematyzowania i dokonania pełnej analizy błędów pomiarowych z uwzględnieniem statystycznej istotności badanych związków,

- przyjęte metodyki badań zarówno podczas modelowania numerycznego jak i testów na stanowisku pomiarowym są konsekwentnie użyte na każdym etapie pracy co świadczy o oryginalności badań i dobrze opanowanym warsztacie naukowo-badawczym Autora.

4. OCENA FORMALNEJ STRONY ROZPRAWY

Oceniana rozprawa liczy 96 stron. Treść zasadnicza obejmuje 78 stron i jest podzielona na pięć rozdziałów. Pozostałą część stanowią: strona tytułowa, podziękowania, spis treści, wykaz ważniejszych oznaczeń i spis literatury. Bibliografia zawiera 103 oznaczone pozycje i jest właściwie dobrana, obejmując zarówno pozycje klasyczne z obszaru tematyki rozprawy jak i najnowsze opracowania z lat 2017 i 2018. W spisie literatury znajduje się jedna pozycja z udziałem Autora rozprawy. Brak jest streszczeń w językach: polskim i angielskim.

Oceniając formalną stronę rozprawy należy zwrócić uwagę na szereg niedociągnięć redakcyjnych oraz stylistycznych, co wprowadza swoisty chaos podczas zapoznawania się z tekstem i co rzutuje na wydłużający się etap merytorycznej oceny pracy.

W trosce o przyszłe publikacje Autora, wśród różnych niedociągnięć formalnych należy podkreślić:

- wieloznaczność niektórych oznaczeń zawartych w wykazie jak np. Literą A oznaczono powierzchnię, nie definiując czego dotyczy?, a w tekście dodatkowo (co jest zbędne wobec właśnie istnienia wykazu) ponowne opisywanie znaczenia, ale dodatkowo z indeksami – jak np. we wzorach 1.6 lub 1.7. Podobnie jest z oznaczeniem wysokości H , masy m , entalpii h . Z kolei parametr r_{sr} definiowany w wykazie jako promień średni krzywizny, w tekście zyskuje miano promienia komory – wzór 1.4,

- grafika na wykresach, wobec braku kolorów i przy równoczesnym stosowaniu bardzo dużych znaczników punktów pomiarowych wielokrotnie sprawia, że wykres przestaje być czytelny merytorycznie np. rys. 3.4, rys. 3.14 lub rys. 3.17. Podobnie jest z demonstracją modelu numerycznego i uzyskanych wyników – rys. 3.13 lub rys. 4.5.

- wielokrotnie występuje brak opisów wykresów (rys. 4.8) lub opisy są skrótami wyrazów, wymagającymi własnej interpretacji przez czytelnika jak np. rys. 1.5, a także odmienne opisy w stosunku do treści zawartych na wykresach – rys. 3.13,

- w tekście występuje wiele miejsc pustych i o ile jest to zrozumiałe w przypadku zakończenia pełnego rozdziału, tak odstępy sięgające pół strony między podrozdziałami lub wynikającymi z nieprzenoszenia wykresów nie są poprawnymi z redakcyjnego punktu widzenia – np. str. 15, str. 8 lub str. 45.

- generalnie Autor używa poprawnego języka, chociaż w rozprawie można znaleźć wyrazy spoza kanonu prac naukowych, stanowiących o tzw. mowie potocznej, często stosowanej w żargonie inżynierskim jak np. „spada” temperatura, „po załadowaniu” siatki numerycznej, „tuż przy powierzchni” – to znaczy ile?

Wykazane w opinii niedociągnięcia nie umniejszają walorów merytorycznych rozprawy, a jedynie wskazują na konieczność doskonalenia działań na badaniach naukowymi i ostatecznie skłaniają do wystawienia Autorowi pozytywnej oceny za wiedzę ogólną i specjalistyczną w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn oraz są potwierdzeniem samodzielności w prowadzeniu pracy naukowej.

5. WNIOSEK KOŃCOWY

Biorąc pod uwagę aktualność podjętej tematyki rozprawy, trafność w zdefiniowaniu celu badawczego i sformułowanie tezy, użycie właściwego metodycznego aparatu badawczego, który zapewnił oryginalność rozwiązania i skuteczność wnioskowania pozytywnie oceniam przedłożoną rozprawę pt. *„Numeryczna analiza procesów ciepłno-przepływowych w komorze roboczej maszyny spiralnej z uwzględnieniem wpływu przecieków wzdłużnych na współczynnik wnikania ciepła”*, wykonaną przez mgr. inż. Józefa Raka.

Za osiągnięcie naukowe Autora uważam wykazanie jakościowego i ilościowego związku między przeciekami wzdłużnymi maszyny spiralnej a warunkami wymiany ciepła oraz zaproponowanie współczynnika korekcyjnego do wyznaczania liczby Nusselta, zapewniającego zmniejszenie rozbieżności między wynikami numerycznymi a wartościami opartymi na parametrach zredukowanych.

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Józefa Raka pt. „Numeryczna analiza procesów ciepłno-przepływowych w komorze roboczej maszyny spiralnej z uwzględnieniem wpływu przecieków wzdłużnych na współczynnik wnikania ciepła”, w rozumieniu Ustawy „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. Ustaw Nr 65 z dnia 14 marca 2003r. z późn. zm.) spełnia wymagania do ubiegania się o stopień naukowy doktora nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn.

Niniejszym rekomenduję Radzie Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.



Zbigniew J. Sroka